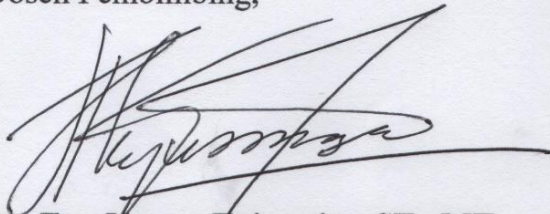
"G-MARINE": BETON RAMAH LINGKUNGAN BERBASIS *HIGH-CALCIUM FLY ASH* UNTUK ELEMEN STRUKTUR PELABUHAN

KARYA ILMIAH YANG DIAJUKAN UNTUK MENGIKUTI
PEMILIHAN MAHASISWA BERPRESTASI
TINGKAT NASIONAL

OLEH

YOSI NOVIARI WIBOWO
NIM 10111610000087
PROGRAM STUDI D IV TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL
FAKULTAS VOKASI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA, 2019

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Karya Tulis	:"*G-MARINE":* Beton Ramah Lingkungan Berbasis *High-Calcium Fly Ash* untuk Elemen Struktur Pelabuhan
Bidang Karya Tulis	: Konstruksi/Transportasi
Nama	: Yosi Noviari Wibowo
NIM	: 10111610000087
Program Studi	: D IV Teknik Infrastruktur Sipil
Fakultas	: Fakultas Vokasi
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dosen Pembimbing	: Dr. Eng Yuyun Tajunnisa, ST., MT.
NIP	: 197802012006042002

Surabaya, 04 April 2019

Diketahui Oleh

Dosen Pembimbing,	Mahasiswa
Dr. Eng Yuyun Tajunnisa, ST., MT.	**Yosi Noviari Wibowo**
NIP. 19780201 200604 2 002	**NIM. 10111610000087**

Disahkan oleh :

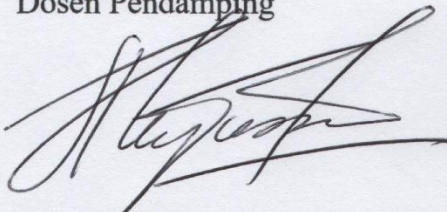
Wakil Rektor Bidang Akademik dan Kemahasiswaan

Prof. Dr. Ir. Heru Setyawan, M.Eng.

NIP. 19670203 199102 1 001

SURAT PERNYATAAN

Saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama	: Yosi Noviari Wibowo
Tempat/Tanggal Lahir	: Bojonegoro/02 November 1998
Program Studi	: D IV Teknik Infrastruktur Sipil
Fakultas	: Fakultas Vokasi
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Judul Karya Tulis	: "*G-MARINE*": Beton Ramah Lingkungan Berbasis *High-Calcium Fly Ash* untuk Elemen Struktur Pelabuhan

Dengan ini menyatakan bahwa Karya Tulis yang saya sampaikan pada kegiatan Pilmapres ini adalah benar karya saya sendiri tanpa tindakan plagiarisme dan belum pernah diikutsertakan dalam lomba karya tulis.

Apabila di kemudian hari ternyata pernyataan saya tersebut tidak benar, saya bersedia menerima sanksi dalam bentuk pembatalan predikat Mahasiswa Berprestasi.

Surabaya, 01 April 2019

Mengetahui,

Dosen Pendamping	Yang menyatakan
	METERAI TEMPEL TGL. 20 84AF8AFF216980315 6000 ENAM RIBU RUPIAH
Dr. Eng Yuyun Tajunnisa, ST., MT.	**Yosi Noviari Wibowo**
NIP. 19780201 200604 2 002	**NIM. 10111610000087**

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim Alhamdulillahirabbil A'alamiin. Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena dengan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah ini dengan judul ***"G-MARINE":* Beton Ramah Lingkungan Berbasis *High-Calcium Fly Ash* untuk Elemen Struktur Pelabuhan** dapat terselesaikan dengan baik. Tentu dalam penulisan karya tulis ilmiah ini masih jauh dari kata sempurna. Penulis bermaksud mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung terselesaikannya penelitian ini, yaitu:

1. Orang tua penulis yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian.
2. Dr. Eng. Yuyun Tajunnisa ST., MT. Selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dalam penyusunan karya tulis ilmiah ini.
3. Dr. Machsus ST., MT. Selaku Kepala Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Achmad Ferdiansyah PP., ST., MT. Selaku koordinator mawapres Institut Teknologi Sepuluh Nopember 2019.
5. Teman-teman mahasiswa Teknik Infrastruktur Sipil yang telah memotivasi dalam penyelesaian karya tulis ilmiah ini.

Akhir kata, dengan segaka kekhilafan penulis ingin menghaturkan permohonan maaf apabila terdapat banyak kekurangan dalam penulisan karya tulis ini. Penulis menerima segala kritik atau saran yang membangun dan bermanfaat untuk kedepannya.

Surabaya, 01 April 2019

Penulis

SUMMARY

Indonesia's maritime region has an abundance of potential resources. In addition, it's the region has high space and accessibility in the field of industrial transportation, so that the development of marine infrastructure has the potential to make Indonesia the axis of world maritime. Considering future challenges for marine construction, the use of portland cement as a construction material needs to be reduced because it contributes to global warming and to the effects of climate change. This is contrary to Goal 13 of the SDGs which aims to combat climate change.

The application of environmentally friendly materials such as geopolymer concrete is one solution to reduce the risk of global warming because it replaces the use of portland cement as a construction material. Along with the improvement in concrete technology, some researchers study fly ash as a geopolymer concrete constituent. There are two types of fly ash that are used generally, namely type C (high-calcium fly ash) and type F (low-calcium fly ash). Generally, researchers use low-calcium fly ash due to its good characteristics for geopolymer concrete, despite the fact that high-calcium fly ash is very abundant and turn to hazardous waste to the environment. High calcium fly ash is rarely used because of its poor characteristics when applied as a main material of geopolymer concrete. The high level of calcium in fly ash causes a quick hardening time of geopolymer concrete so it is very difficult to be implemented as a large-scale construction material.

This paper discusses **G-Marine** as an innovation in developing high-calcium fly ash-based geopolymer concrete products with an alternative mixing method to maximize the potential of this type of fly ash waste. This innovation aims to produce port construction materials. To overcome the disadvantages of high-calcium fly ash when used as geopolymers, this innovation developed a geopolymer concrete mixing method called the Separate Method. A **separate method** is the mixing method by means of primarily reacting the fly ash with NaOH solution with the principle of solid-liquid extraction (leaching). This method can extend the hardening time and improve the quality of concrete so that it can be applied as a large-scale construction material. Several tests were conducted in this study,

including Hardening Time Test, Compressive Strength Test, UPV Test, and Permeability Test.

Setting time test for G-Marine paste hardening were **15 minutes** for normal mixing methods and **195 minutes** for separate mixing methods. These results indicate that separate methods are easier to implement in large-scale construction. In terms of quality, the compressive strength of normal mixing methods of reached **33.93 MPa**, while the compressive strength of separate mixing methods reached **40.34 MPa**. Compressive strength test at 28 days with a separate method has fulfilled the requirements of SNI 2847-2013 for marine building construction material, which is above 35 MPa. The results of compressive strength indicate that exposure to seawater improve the quality of geopolymer concrete. Increasing the quality of concrete due to seawater exposure proves that G-Marine has the potential to be implemented as a port construction material. Further, the UPV test produced an average ultrasonic wave velocity of 2763.3 m/s for the normal mixing method and 4046.67 m/s for the separate mixing method at 28 days. Based on the IS 1331101-1992 standard, the quality of concrete with a separate method is classified as the "good" category, whereas the normal method is classified as the "doubtful" category. Furthermore, permeability testing produces coefficients of **$0{,}444 \times 10^{-16} m^2$** for the normal method and **$0{,}167 \times 10^{-16} m^2$** for the separate method. The smaller the permeability coefficient, the harder it is for concrete to pass through water. This data supports the statement that geopolymer concrete made by a separate method has better quality when applied as a port construction material.

Further review will be carried out to prove the durability of G-Marine in long-term seawater environment. Further research efforts will be carried out so that this product can be implemented in the next two years as a port structural element. The application of G-Marine can support the nation's economic growth. The cost analysis aspect showed that implementation of G-Marine is more economical up to **14,8%** compared to conventional marine concrete. Lower implementation costs support this innovation to increase the procurement of marine infrastructure in order to realize Indonesia as the world's maritime axis.

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

DAFTAR LAMPIRAN

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki sumber daya laut yang melimpah. Pengembangan infrastruktur di bidang maritim adalah salah satu cara yang berpotensi menjadikan Indonesia sebagai poros maritim dunia. Salah satu faktor dalam mewujudkan poros maritim adalah peningkatan transportasi laut, seperti halnya pembangunan pelabuhan. Beton merupakan komponen penting dalam struktur bangunan pelabuhan. Dalam proses pembuatan beton, komponen paling penting yang dibutuhkan yaitu semen, sebagai bahan pengikat material lain yang memberikan kekuatan dan ketahanan beton terhadap segala situasi lingkungan. Namun, proses produksi semen memiliki dampak buruk, yaitu hasil samping berupa emisi gas CO_2 hingga 7% per tahun sekaligus menduduki peringkat kedua terbesar sebagai penghasil gas efek rumah kaca (Malhotra dkk, 2005). Industri semen juga melepaskan hasil samping berupa gas SO_3 dan NO_x di atmosfer menyebabkan perubahan iklim (Anand dkk, 2006) dimana hal tersebut bertentangan dengan konsep penanganan perubahan iklim pada ***goal* 13 *SDGs***.

Para ahli mulai berpikir untuk menemukan material baru yang mendukung industri konstruksi sebagai material alternatif yang ramah lingkungan. Salah satu yang dikembangkan adalah beton geopolimer. Beton ini menggunakan sumber bahan silika dan alumina alam dengan aktivator basa (Davidovits, 1994). Sumber alumina silika yang digunakan merupakan hasil sintesa produk sampingan seperti *fly ash*, *mill scale*, *blast furnace slag*, *rice husk ash*, dan lain-lain yang banyak mengandung silika dan alumina (Davidovits, 2011). Salah satu sumber alumina silika yang tersedia secara luas dan sering digunakan adalah *fly ash* dengan jumlah 2.260 juta ton per tahun atau 12 kali ketersediaan semen *portland* (Konig, 2010). Sebagian besar produk sampingan ini dibuang begitu saja di alam, sehingga menimbulkan kerusakan lingkungan. Walaupun dalam jumlah sedikit, pembuangan *fly ash* dapat mengakibatkan pencemaran air, tanah, dan udara (Haynes, 2009), karena mengandung beberapa elemen beracun seperti *arsenic*, *polycyclic aromatic*

hydrocarbons dan *crystalline silica* yang memiliki dampak buruk terhadap kesehatan pada mahluk hidup (Smith dkk, 2006 ; Brom, 1997).

Jenis *fly ash* yang digunakan sebagai material pengikat pada beton geopolimer umumnya terdapat 2 tipe, yaitu tipe C (*high-calcium fly ash*) dan tipe F (*low-calcium fly ash*) (Tajunnisa dkk, 2017). Dalam penggunaannya, *high-calcium fly ash* sangat jarang digunakan dalam campuran beton geopolimer karena memiliki kadar CaO lebih besar dari 10%. Tingginya kadar kalsium tersebut menyebabkan waktu pengerasan beton geopolimer berlangsung terlalu cepat (Topark-Ngarm dkk, 2015) sehingga **beton sangat sulit diaplikasikan** sebagai material konstruksi skala besar.

Oleh karena itu, untuk menyelesaikan masalah terlalu cepatnya pengerasan beton, karya tulis ini membahas **variasi metode pencampuran** agar semen geopolimer dapat diaplikasikan sebagai material konstruksi skala besar. Nantinya, hasil pengujian benda uji disesuaikan dengan standarisasi elemen struktur pelabuhan, yaitu SNI 2847-2013. Dengan adanya inovasi ini diharapkan dapat memaksimalkan potensi limbah *fly ash* yang ada di Indonesia untuk mengatasi masalah kebutuhan material konstruksi dan dampak pemanasan global.

1.2 Metode Pengembangan Produk

Pengembangan produk beton geopolimer berbasis *high-calcium fly ash* dilakukan dengan cara mengubah metode pencampuran untuk memperpanjang waktu pengerasan dan meningkatkan kualitas beton. Metode yang dikembangkan adalah **Metode Terpisah** (Gambar 4), dimana *fly ash* direaksikan dengan larutan terlebih dahulu dengan prinsip ekstraksi padat-cair (*leaching*). Cara ini dapat memperpanjang waktu pengerasan dan meningkatkan kualitas beton geopolimer, sehingga dapat diaplikasikan sebagai material konstruksi skala besar.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan diselesaikan pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana karakteristik material limbah *high-calcium fly ash* yang ada di Indonesia sehingga dapat diaplikasikan sebagai beton geopolimer?

2. Bagaimana pengaruh pencampuran dengan metode normal dan metode terpisah terhadap kualitas beton geopolimer berbasis *high-calcium fly ash* untuk aplikasi bangunan laut?
3. Bagaimana implementasi material limbah *high-calcium fly ash* sebagai material konstruksi pelabuhan?
4. Bagaimana perbandingan biaya antara beton geopolimer dengan beton konvensional untuk aplikasi konstruksi pelabuhan?

1.4 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui karakteristik material limbah *high-calcium fly ash* yang ada di Indonesia sebagai dapat diaplikasikan sebagai beton geopolimer.
2. Mengetahui pengaruh pencampuran dengan metode normal dan metode terpisah terhadap kualitas beton geopolimer berbasis *high-calcium fly ash* untuk aplikasi bangunan laut.
3. Mengimplementasikan material limbah *high-calcium fly ash* sebagai material konstruksi pelabuhan.
4. Menjelaskan perbandingan biaya pada beton geopolimer dengan beton konvensional untuk aplikasi konstruksi pelabuhan

1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengembangkan metode pencampuran beton geopolimer yang lebih aplikatif untuk diterapkan sebagai material konstruksi skala besar.
2. Memanfaatkan limbah *fly ash* yang jarang digunakan sebagai material dasar beton geopolimer untuk aplikasi struktur pelabuhan.
3. Sebagai pengembangan ilmu di bidang teknik sipil untuk meminimalisasi dampak buruk yang disebabkan oleh industri semen.

BAB II

TELAAH PUSTAKA

2.1 Hubungan *SDGs* dengan Beton Geopolimer

Kebutuhan material konstruksi mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur. Dengan mempertimbangkan dampak perubahan iklim yang disebabkan oleh industri semen, diperlukan material pengganti yang ramah lingkungan dalam jumlah besar. Penerapan *green material* seperti beton geopolimer sebagai material konstruksi pelabuhan dapat mendukung tercapainya tujuan *SDGs* khususnya yang berkaitan dengan "industri, inovasi, dan infrastruktur (*Goal* 9)", "Kota dengan permukiman yang berkelanjutan (*Goal* 11)", serta "penanganan perubahan iklim (*Goal* 13)" (Lampiran 1)

2.2 Teori Penunjang

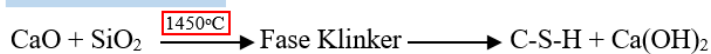
2.2.1 Terminologi Beton Geopolimer

Teknologi beton geopolimer diperkenalkan oleh Davidovits tahun 1978. Geopolimer terbentuk dari bahan anorganik yang kaya akan silika (Si) dan Alumina (Al) yang bereaksi dengan larutan alkali menghasilkan semen geopolimer dengan tujuan utama menggantikan konsep material pengikat pada beton konvensional yang menyumbang CO_2. Reaksi polimer yang terjadi di semen geopolimer berbeda dengan reaksi hidrasi yang terjadi pada semen *portland*. Perbedaan sederhana antara keduanya dapat dilihat pada (Gambar 1):

Semen *Portland:*

$$CaO + SiO_2 \xrightarrow{1450^\circ C} \text{Fase Klinker} \longrightarrow \text{C-S-H} + Ca(OH)_2$$

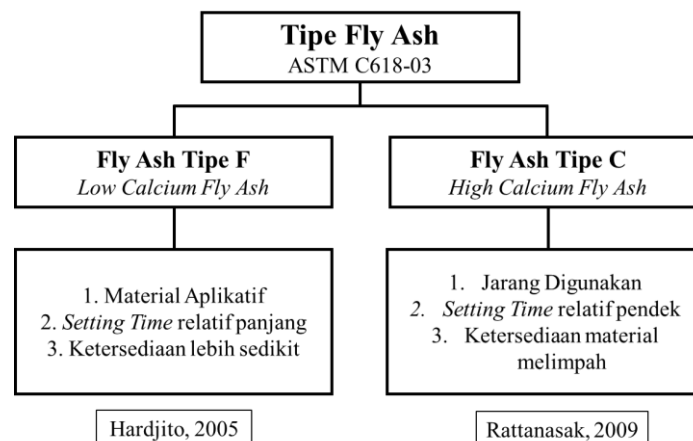
Semen Geopolimer

$$Al_2SiO_3 + SiO_2 \xrightarrow{20^\circ C - 90^\circ C + \text{Larutan Alkali}} \text{-Si-O-Al-O-} \xrightarrow{\text{Polikondensasi}} \text{Kerangka 3D Aluminosilikat}$$

Gambar 1. Proses Hidrasi Semen Portland dan Polimerisasi Semen Geopolimer
Sumber : Davidovits, 1994

Bagan diatas menunjukkan bahwa pembentukan semen geopolimer tidak membutuhkan pembakaran pada suhu tinggi. Berbeda dengan pembuatan semen portland yang membutuhkan fase pembakaran dalam proses pembuatannya, sehingga menghasilkan emisi CO_2 yang berdampak buruk terhadap lingkungan.

2.2.2 Fly Ash

Beberapa negara mempunyai perbedaan dalam spesifikasi fly ash. Standar Amerika (ASTM C 618) mengkategorikan pembakaran batu bara menjadikan *fly ash* dibagi dalam 2 kelas yaitu: kelas C dan F (Lampiran 2). Kelas F dihasilkan oleh pembakaran batu bara antrasitatau bitumen (batubara tua). Kelas C dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau sub-bitumen (batubara muda). *Fly ash* kelas C mengandung CaO lebih besar dari 10% sampai 40% dan kelas F umumnya kurang dari 10% CaO (Naik dkk, 1993).

Fly ash merupakan salah satu material *pozzolan* yang berasal dari pembakaran batubara pada PLTU. Dengan volume ketersediaan 2260 juta ton per tahun, *fly ash* berpotensi sebagai material yang paling aplikatif untuk digunakan (Bakrie dkk, 2012 ; A.M Mustafa dkk, 2012). Namun, tren karakteristik batubara di Indonesia yang digunakan untuk pembangkit listrik telah berubah dari waktu ke waktu. Karena eksplorasinya secara luas sebagai sumber energi alternatif minyak dan gas selama dekade terakhir, batubara berkualitas tinggi (batubara tua) menjadi langka dan sulit ditemukan (Darmawan dkk, 2015). Akibatnya, batubara berkualitas rendah (batubara muda) lebih sering digunakan untuk operasi pembangkit listrik. Berikut perbedaan karakteristik *fly ash* berdasarkan jenisnya:

Gambar 2. Karakteristik *Fly Ash* Berdasarkan Penelitian Sebelumnya

2.2.3 Larutan Alkali

Larutan alkali berfungsi untuk membantu reaksi polimerasi beton geopolimer. Larutan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Sodium*

Hydroxide (NaOH) dan *Sodium Silica* (Na_2SiO_3). *Sodium Hydroxide* dalam beton geopolimer berfungsi untuk mereaksikan Al dan Si yang terkandung dalam material sehingga dapat menghasilkan *polymer bond* yang kuat, sedangkan *sodium silica* berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi beton geopolimer (Ryu dkk, 2013).

2.3 Standarisasi Elemen Struktur Pelabuhan

Persyaratan mendasar untuk struktur laut serupa dengan jenis struktur beton lainnya, yaitu ketahanan dan keandalan struktural. Struktur beton harus cukup stabil dan kuat untuk menahan berbagai jenis pemuatan dalam jangka panjang tanpa resiko kegagalan hingga mencapai umur layan yang telah direncanakan. Persyaratan durabilitas beton laut diatur dalam SNI 2847-2013 pasal 4 sesuai dengan kategori dan kelas paparan air laut (Lampiran 3).

2.4 Penelitian Sebelumnya

Karya tulis ilmiah ini menggunakan penelitian terdahulu oleh para peneliti untuk dijadikan referensi dan pengumpulan data penulisan. Adapun metode dan hasil penelitian dapat dilihat pada Lampiran 4.

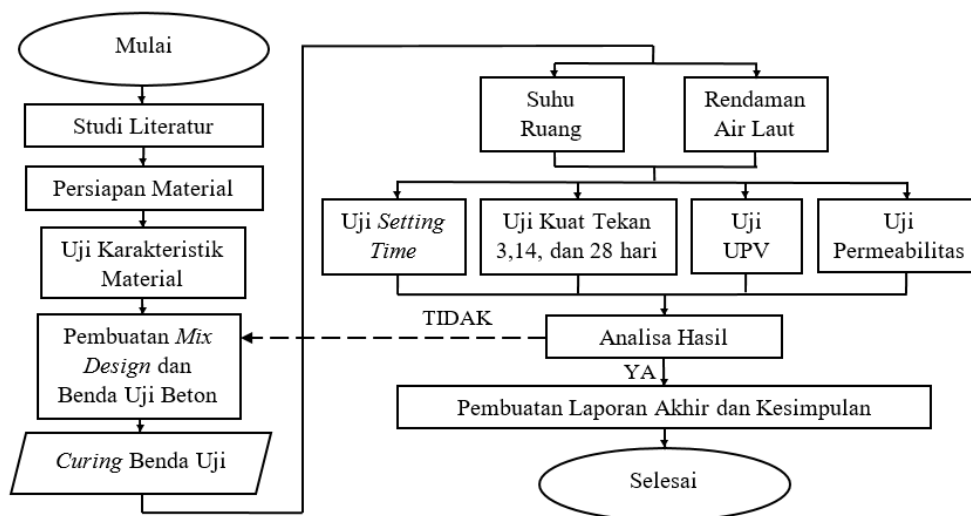
Tabel 1. Penelitian Sebelumnya

Tahun	Peneliti	Judul Penelitian	Analisis	Hasil Penelitian
2015	Pattanapong Topark-Ngarm, Prinya Chindaprasirt, Vanchai Sata	Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete	Variasi molar tinggi NaOH terhadap waktu ikat dan mutu beton geopolimer (Metode Terpisah)	Komposisi optimum geopolimer dengan kadar Na_2O 12% dan NaOH 15M
2019	Yuyun Tajunnisa, Ridho Bayuaji, Nur Ahmad Husin, Yosi Noviari Wibowo, Mitsuhiro Shigeishi	Characterization Alkali-Activated Mortar Made From Fly Ash and Sandblasting	Pengaruh substitusi limbah sandblasting terhadap kuat tekan dan waktu pengerasan beton geopolimer berbasis *fly ash* tipe C (Metode Normal)	Substitusi limbah sandblasting dapat memperpanjang waktu pengerasan beton geopolimer berbasis *fly ash* tipe C

Penelitian sebelumnya terdapat kekurangan yaitu sulitnya penerapan beton geopolimer berbasis *high-calcium fly ash* sebagai material konstruksi skala besar. Oleh karena itu, karya tulis ini melakukan optimasi metode pencampuran sebagai inovasi untuk menerapkan beton geopolimer untuk material konstruksi.

BAB III
DESKRIPSI PRODUK

3.1 Metode Pembuatan Produk

Metodologi sangat penting dan diperlukan dalam sebuah pembuatan produk agar inovasi yang dilakukan lebih terarah sehingga hasil yang didapatkan lebih optimum. Adapun metodologi pembuatan produk yang telah dilakukan dalam karya tulis ilmiah ini adalah sebagai berikut:

Gambar 3. Metode Pembuatan *G-Marine Concrete*
Sumber : Penulis, 2019

3.1.1 Studi Literatur

Studi literatur berisi serangkaian kegiatan pengkajian sumber-sumber terpercaya dan relevan untuk mengumpulkan informasi sebagai acuan dalam penerapan inovasi ini. Literatur metitikberatkan pada jurnal ilmiah mengenai beton geopolimer berbasis *fly ash.*

3.1.2 Persiapan Material

Pembuatan prototipe *G-Marine Concrete* membutuhkan beberapa material penyusun meliputi: 1. *Fly ash*, 2. Agregat halus (Pasir), 3. Agregat kasar (Kerikil), 4. Larutan Alkali (NaOH dan Na_2SiO_3).

3.1.3 Uji Karakteristik Material

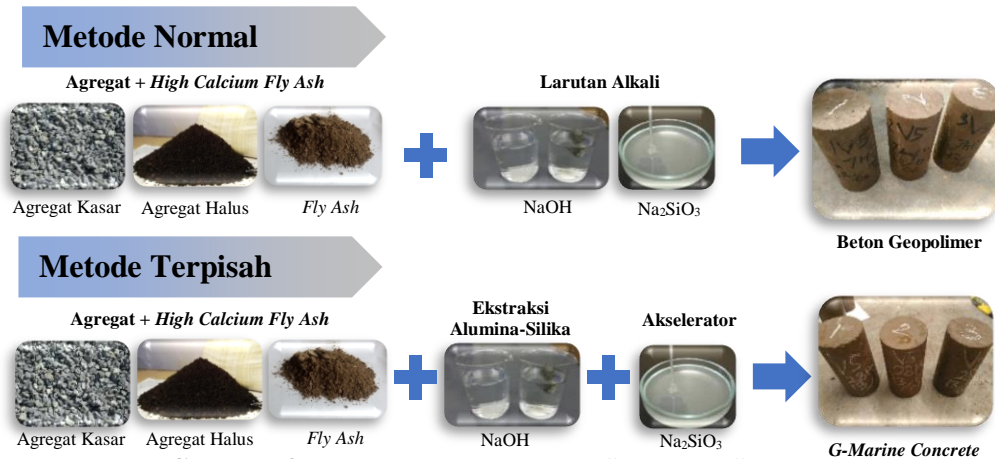
A. Uji XRF (X-Ray Fluorescene)

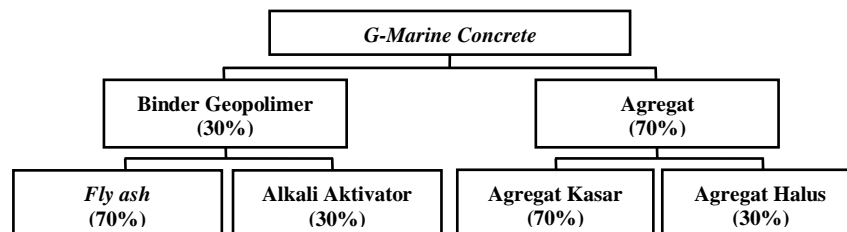
Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui kandungan senyawa kimia dalam suatu material. Pengujian XRF dilakukan LPPM ITS, Surabaya.

B. Uji XRD (X-Ray Diffraction)

Uji XRD merupakan teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dan fasa amorf dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi. Pengujian XRD dilakukan di PT. Semen Indonesia.

3.1.4 Perancangan *Mix Design* dan Benda Uji Beton

Pembuatan *G-Marine Concrete* menggunakan 2 metode pencampuran, yaitu metode normal sebagai variabel kontrol dan metode terpisah sebagai variabel bebas. Perencanaan eksperimen menggunakan benda uji silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm.

Gambar 4. Metode Pencampuran *G-Marine Concrete*
Sumber : Penulis, 2019

Perencanaan campuran *G-Marine* mengacu pada penelitian terdahulu oleh (Hardjito, 2005 ; Rattansak dkk, 2011). Rasio alkali aktivator antara sodium silikat dan NaOH adalah 1:1. Gambar 5 menunjukkan proporsi campuran *G-Marine Concrete*.

Gambar 5. Bagan Campuran *G-Marine Concrete*

3.1.5 Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Perawatan pada *G-Marine Concrete* menggunakan cara merendam benda uji ke dalam air laut dan paparan udara bebas selama 3, 7, dan 28 hari.

Perendaman benda uji dilakukan sesuai standar ASTM D1141-98 dalam wadah tertutup, artinya faktor yang memberikan efek terhadap beton hanya pembasahan serta serangan sulfat dan klorida (Lampiran 5).

3.1.6 Pengujian Beton

Pengujian benda uji beton bertujuan untuk mengetahui kualitas prototipe *G-Marine Concrete*. Hasil pengujian akan disesuaikan dengan standar elemen struktur pelabuhan, yaitu SNI 2847-2013 Pasal 4.2 (Lampiran 3).

Tabel 2. Pengujian *G-Marine Concrete*

Pengujian	Tujuan	Standar Pengujian
Uji *Setting Time*	Mengetahui waktu pengerasan beton	SNI 03-6827-2002
Uji Kuat Tekan	Mengetahui kekuatan tekan batas	ASTM C39-96
Uji UPV (*Ultraviolet Pulse Velocity*)	Mengetahui kepadatan beton	IS 1331101-1992
Uji Permeabilitas	Mengetahui sifat permeabilitas beton terhadap air	SN 505 252/1, Annex E

3.1.7 Analisa Hasil

Tahap analisa hasil ini melakukan pengecekan hasil pengujian terhadap produk *G-Marine Concrete* sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Produk *G-Marine Concrete* yang dibuat dengan metode normal dan metode terpisah akan dibandingkan kualitasnya untuk menentukan metode mana yang lebih aplikatif untuk diterapkan dalam konstruksi skala besar.

3.1.8 Pembuatan Laporan Akhir dan Kesimpulan

Penyusunan laporan akhir dan pengambilan kesimpulan dilakukan setelah menganalisa data yang telah diperoleh. Evaluasi hasil pengujian perlu dilakukan guna mengetahui kelebihan dan kekurangan produk untuk pembenahan kualitas prototipe *G-Marine Concrete* agar bisa diterapkan di kemudian hari.

3.2 Timeline Kegiatan dan Rencana Anggaran Biaya

Pelaksanaan kegiatan untuk menerapkan inovasi ini dilakukan selama 5 bulan dengan rincian terdapat pada Lampiran 6. Anggaran biaya yang dibutuhkan dalam kegiatan ini sebesar Rp. 3.550.000 dengan rincian pada Lampiran 7.

BAB IV

PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Limbah *High-Calcium Fly Ash*

Pengujian *XRF* dan *XRD* dilakukan untuk mengetahui karakteristik material limbah *high-calcium fly ash.*

4.1.1 Pengujian *XRF (X-Ray Fluorescene)*

Pengujian *XRF* dilakukan untuk melihat kandungan yang ada pada material yang akan digunakan. Berdasarkan kandungan senyawa, material *fly ash* dapat diklasifikasikan berdasarkan standar ASTM C618-03 Lampiran 2.

Tabel 3. Hasil Uji XRF *Fly Ash*

Material	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O	LOI*
***Fly Ash* (%)**	34,52	18,16	12,36	19,56	1,69	9,25	1,03	0,5

Berdasarkan standar ASTM C618-03, material yang digunakan tergolong sebagai ***fly ash* tipe C** (*high-calcium fly* ash) dengan kandungan SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 sebesar 65,04% dan kandungan CaO sebesar 19,56%.

4.1.2 Pengujian *XRD (X-Ray Diffraction)*

Pengujuan *XRD* dilakukan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dan fasa amorf pada suatu material.

Tabel 4. Hasil Uji XRD *Fly Ash*

Partikel Solid	**%**	**Partikel Solid**	**%**
Quartz	8,49	Magnetite	3,31
Arcanite	3,15	Lime	1,06
Periclase	8,89	Magnesite	6,54
Hematite	2,87	Brownmillerite	14,66
Anyhydrite	3,55	Amorphous	44.09

Fasa Kristalin   Fasa Amorf

Hasil analisa XRD pada Tabel 4 menunjukkan bahwa fasa kristalin lebih dominan dibandingkan dengan fasa amorf. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas *fly ash* tipe C yang digunakan **kurang baik**, karena reaksi dalam beton geopolimer dominan terjadi karena adanya padatan amorf. Padatan amorf lebih reaktif untuk melarutkan Si dan Al dengan alkali aktivator, sehingga menghasilkan geopolimer yang lebih kuat (Lloyd dkk, 2009 ; A. Fernandez-Jimenez dkk, 2007 ; A. Fernandez-Jimenez, A.Palomo 2005).

4.2 Pengaruh Pencampuran dengan Metode Normal dan Metode Terpisah

Berdasarkan pembahasan pada bab 4.1 diketahui bahwa *high-calcium fly ash* kualitasnya kurang baik apabila diterapkan sebagai material dasar beton geopolimer. Oleh karena itu, perlu dilakukan inovasi metode pencampuran untuk memaksimalkan potensi limbah *fly ash*. Untuk mengetahui pengaruh metode pencampuran, maka dilakukan pengujian kualitas beton geopolimer dari masing-masing metode pencampuran. Pengujian beton geopolimer meliputi uji waktu pengerasan (*setting time test*), uji kuat tekan, uji UPV (*Ultraviolet Pulse Velocity*), dan uji permeabilitas.

4.2.1 Hasil Uji Waktu Pengerasan (*Setting Time Test*)

Pengujian waktu pengerasan pasta geopolimer menggunakan alat *Vicat Apparatus* dihasilkan waktu pengerasan selama **15 menit** untuk pencampuran metode normal dan **195 menit** untuk pencampuran metode terpisah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode pencampuran secara terpisah memberikan dampak cukup signifikan dengan waktu pengerasan mendekati beton normal selama **220 menit** (Dave dkk, 2016). Dengan waktu pengerasan selama 195 menit, beton geopolimer lebih mudah diaplikasikan pada konstruksi skala besar.

4.2.2 Hasil Uji Kuat Tekan

Uji kuat tekan dilakukan pada saat beton mencapai umur 3, 7, dan 28 hari. Pengujian ini dilakukan di Labolatorium Material dan Struktur Gedung Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi, ITS Surabaya.

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tekan *G-Marine Concrete*

Umur	**Kuat Tekan Mpa**	**Standar Deviasi**	**Kuat Tekan Mpa**	**Standar Deviasi**	***Curing***
	Metode Normal		**Metode Terpisah**		
3 Hari	9.00	1.28	10.95	1.41	Suhu Ruang
7 Hari	17.95	2.17	22.19	1.30	
28 Hari	32.65	5.66	**36.70**	6.93	
3 Hari	9.77	1.73	12.53	1.08	Air Laut
7 Hari	20.15	1.61	26.50	1.42	
28 Hari	33.93	8.01	**40.34**	3.33	

Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa *G-Marine* yang dibuat dengan metode terpisah memiliki kuat tekan **lebih tinggi** dibandingkan dengan

beton yang dibuat dengan metode normal. Pencampuran dengan metode normal kuat tekannya mencapai **33,93 MPa**, sedangkan pencampuran metode terpisah kuat tekannya mencapai **40,34 MPa**. Pengujian kuat tekan pada 28 hari dengan metode terpisah telah memenuhi persyaratan SNI 2847-2013 sebagai material konstruksi bangunan laut, yaitu diatas 35 MPa. Hasil kuat tekan menunjukkan bahwa paparan air laut dapat meningkatkan mutu beton geopolimer. Peningkatan kualitas beton akibat paparan air laut membuktikan bahwa *G-Marine* berpotensi untuk diimplementasikan sebagai material konstruksi pelabuhan.

4.2.3 Hasil Uji UPV (*Ultraviolet Pulse Velocity*)

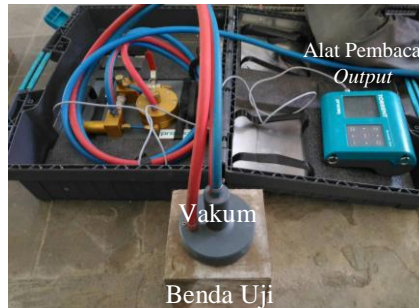
Uji UPV dilakukan untuk mengetahui kepadatan beton dengan memanfaatkan kecepatan gelombang ultrasonik. Semakin cepat rambatan gelombang yang melalui beton, maka kepadatan beton tergolong baik.

Gambar 6. Pengujian UPV (*Ultraviolet Pulse Velocity*)
Sumber: Penulis, 2019

Hasil rata-rata kecepatan gelombang ultrasonik sebesar **2763,3 m/s** untuk metode pencampuran normal dan **4046.67 m/s** untuk metode pencampuran terpisah pada umur 28 hari. Berdasarkan standar IS 1331101-1992, kualitas beton dengan metode pencampuran terpisah tergolong **baik**, sedangkan dengan metode pencampuran normal tergolong kategori **meragukan** (Lampiran 8).

4.2.4 Hasil Uji Permeabilitas

Uji permeabilitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dilalui air. Pengujian dilakukan saat beton mencapai umur 28 hari dengan paparan air

laut. Pengujian ini dilakukan di Labolatorium Material dan Struktur Gedung Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi, ITS Surabaya.

Gambar 7. Uji Permeabilitas *G-Marine Concrete*
Sumber: Penulis, 2019

Berdasarkan hasil uji permeabilitas, pencampuran dengan metode terpisah menghasilkan koefisien permeabilitas lebih kecil dibandingkan dengan metode normal (Tabel 6).

Tabel 6. Hasil Uji Permeabilitas *G-Marine Concrete*

Metode Pencampuran	Permeabilitas		Kualitas Benda Uji
	kT	L	
	($E\text{-}16m^2$)	(mm)	
Normal	0,444	44,2	Normal
Terpisah	0,167	28,4	Normal

Semakin kecil koefisien permeabilitas, maka semakin sulit beton dilalui oleh air. Data ini mendukung pernyataan bahwa beton geopolimer yang dibuat dengan metode terpisah memiliki kualitas lebih baik apabila diterapkan sebagai material konstruksi pelabuhan.

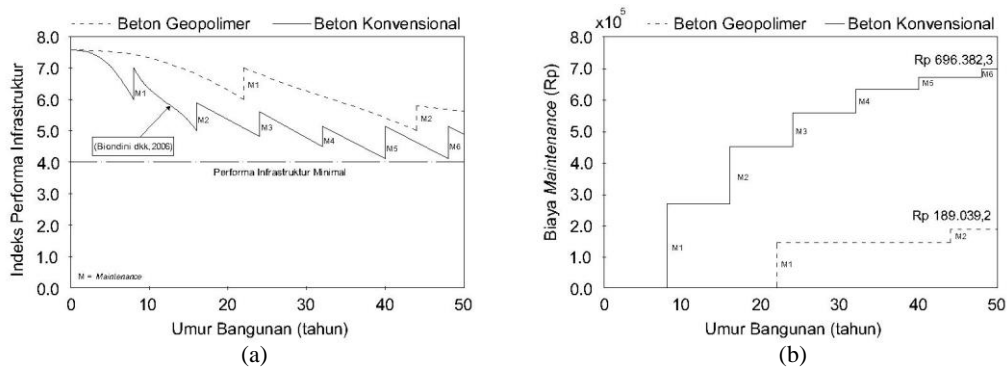
4.3 Implementasi Limbah *High-Calcium Fly Ash* pada Struktur Pelabuhan

Setelah dilakukan berbagai pengujian fundamental, diketahui bahwa limbah *high-calcium fly ash* berpotensi besar untuk dijadikan material pengganti semen sebagai elemen struktur pelabuhan. Metode pencampuran secara terpisah dapat menghasilkan beton geopolimer berbasis *high-calcium fly ash* yang memenuhi standar sebagai elemen struktur pelabuhan. Inovasi ini perlu dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan peninjauan pada perilaku air laut terhadap keawetan beton dalam jangka panjang. Setelah dilakukan pengembangan, nantinya *G-Marine Concrete* akan diterapkan sebagai produk beton *precast* untuk pelat dermaga. Targetnya, produk ini dapat diimplementasikan 2 tahun mendatang. Rincian *Roadmap* implementasi produk disajikan pada Lampiran 9.

Gambar 8. *Roadmap* Implementasi *G-Marine*

4.4 Perbandingan Biaya Beton Konvensional dengan *G-Marine*

Rincian perbandingan biaya per meter kubik untuk beton konvensional dengan *G-Marine* terdapat pada Lampiran 10. Harga per meter kubik beton konvensional sebesar **Rp1.468.032,** sedangkan *G-Marine* sebesar **Rp1.655.264**. Selanjutnya dilakukan perbandingan perawatan (*maintenance*) infrastrukturnya.

(a) (b)

Gambar 9. (a) Perencanaan perbaikan, (b) Biaya perbaikan per meter kubik
Sumber: Penulis, 2019

Gambar 9a menunjukkan asumsi perbaikan pada struktur beton yang dilakukan selama umur layan 50 tahun. Perbaikan struktur beton laut konvensional dilakukan setiap 8 tahun untuk mencegah kerusakan besar (Biondini dkk, 2006), sedangkan perbaikan struktur beton geopolimer dapat dilakukan setiap 21 tahun karena memiliki keawetan **2,7 kali** lebih baik dibanding beton konvensional (Tennakoon dkk, 2017). Gambar 9b menunjukkan biaya perbaikan beton yang dilakukan selama umur layan 50 tahun. Rincian perhitungan terdapat pada Lampiran 11.

Tabel 7. Perbandingan Biaya Beton Konvensional dengan *G-Marine*

Beton Konvensional	Biaya Maintenance Per m^3	Rp	696.382,35
	Biaya Pengadaan Beton Per m^3	Rp	1.468.032,00
	Total Biaya Pengeluaran	**Rp**	**2.164.414,35**
G-Marine	Biaya Maintenance Per m^3	Rp	189.039,16
	Biaya Pengadaan Beton Per m^3	Rp	1.655.264,00
	Total Biaya Pengeluaran	**Rp**	**1.844.303,16**

Data perhitungan pada Tabel 7 menunjukkan bahwa implementasi *G-Marine* sebagai material konstruksi pelabuhan dapat menghemat anggaran sebesar **14,8%**.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan rangkaian pengujian, diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Material *high-calcium fly ash* kualitasnya **kurang baik** untuk dijadikan sebagai bahan dasar beton geopolimer. Tingginya kadar kalsium pada *fly ash* menyebabkan waktu pengerasan beton geopolimer terlalu cepat, sehingga beton sangat sulit diimplementasikan sebagai material konstruksi skala besar.
2. Pengujian waktu pengerasan pasta *G-Marine* dihasilkan selama **15 menit** untuk pencampuran metode normal dan **195 menit** untuk pencampuran metode terpisah. Dari segi mutu, pencampuran metode normal kuat tekannya mencapai **33,93 MPa**, sedangkan pencampuran metode terpisah kuat tekannya mencapai **40,34 MPa**. Pengujian kuat tekan pada 28 hari dengan metode terpisah telah memenuhi persyaratan SNI 2847-2013 sebagai material konstruksi bangunan laut, yaitu diatas 35 MPa. Hasil pengujian lainnya meliputi Uji UPV dan Uji Permeabilitas diketahui bahwa *G-Marine* yang dibuat dengan metode terpisah kualitasnya lebih baik dibandingkan dengan metode normal (Lampiran 12).
3. Peninjauan keawetan beton di lingkungan laut dalam jangka panjang perlu dilakukan untuk mengimplementasikan inovasi *G-Marine*. Upaya penelitian lanjutan akan dilakukan agar produk ini dapat diimplementasikan **2 tahun** mendatang sebagai beton *precast* untuk pelat dermaga.
4. Biaya implementasi *G-Marine* lebih ekonomis sebesar **14,8%** dibandingkan dengan beton laut konvensional. Biaya implementasi yang lebih rendah mendukung inovasi ini untuk meningkatkan pengadaan infrastruktur laut guna mewujudkan Indonesia sebagai poros maritim dunia.

5.2 Rekomendasi

Dalam pelaksanaan inovasi ini, peninjauan *G-Marine* sebatas uji fisik dan karakteristik material penyusunnya. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengimplementasikan *G-Marine* dalam skala besar sebagai elemen struktur pelabuhan. Peninjauan keawetan beton di lingkungan air laut perlu dilakukan untuk mengetahui lamanya beton dapat memikul beban konstruksi pada lingkungan laut.

DAFTAR PUSTAKA

A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, 2005. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. *Cement and Concrete Research,* Volume 35, pp. 1984-1992.

A. Fernandez-Jimenez, I. Gracia-Loredeiro, A. Palomo, 2007. Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials. *Journal of Materials Science,* Volume 3055-3065, p. 42.

A.M. Mustafa Al Bakrie, H. Kamarudin, M. Bnhussain, A.R. Rafiza, Y. Zarina, 2012. The Relationship of NaOH Molarity, Na2SiO3/NaOH Ratio, Fly Ash/Alkaline Activator Ratio, and Curing Temperature to the Strength of Fly Ash-Based Geopolymer. *ACI Materials Journal,* Volume 109(5), pp. 503-508.

Anand, S., Vrat, P., Dahiya, R., 2006. Application of a System Dynamics Approach for Assessment and Mitigation of CO2 Emmision from Cement Industry. *Journal of Environ Manage,* Volume 79(4), pp. 383-98.

Badar Md. S., Kunal Kupwade-Patil, Susan A.Bernal, John L. Provis, Erez N. Allouche, 2014. Corrosion of Steel Bars Induced by Accelerated Carbonation in Low and High Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials,* Volume 61, pp. 79-89.

Biondini, F., Franco Bontempi, Dan M. Frangopol, and Pier Giorgio Malerba, 2006. Probabilistic Service Life Assessment and Maintenance Planning of Concrete Structure. *Hournal of Structural Engineering,* Volume 132. 810-825.

Brom, P. J. A., 1997. Toxicity and Occupational Health Hazards of Coal Fly Ash (CFA). A Review of Data and Comparison to Coal Mine Dust. *Pergamon,* 41(6)(British Occupational Hygiene Society), pp. 659-676.

Darmawan, M. S., Ridho Bayuaji, Nur Ahmad Husin, Chomaedi, Ismail Saud, 2015. A Case Study of Low Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash in East Java Indonesia. *Procedia Engineering,* Volume 125, pp. 579-586.

Dave, N., Anil Kumar Misra, Amit Srivastava, S.K. Kaushik, 2016. Setting Time and Standard Consistency of Quaternary Binders: The Influence of Cementitious Material Addition and Mixing. *International Journal of Sustainable Built Environment.*

Davidovits, J., 1994. Properties of geopolymer cements. *Alkaline Cements and Concretes,* Issue Properties of Geopolymer Cements, pp. 131-149.

Davidovits, J., 2011. *Geopolymer Chemistry and Applications.* 3ed ed. edition ed. France: Geopolymer Institute.

Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., and Chindaprasirt, P., 2014. Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cem. Concr. Compos,* Volume 45, pp. 9-14.

Hardjito, D., 2005. *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.* Bentley: Curtin University of Technology.

Haynes, R., 2009. Reclamation and Revegetation of Fly Ash Disposal Sites – Challenges and research needs. *Journal of Environtmental Management,* Volume 90, pp. 43-53.

Konig, S., 2010. *Global mining investment conferece : Strategic Metals and The Clean-Tech Revolution.* London, s.n.

Lloyd N.S., S.R.N. Chenery, R.R. Parrish, 2009. The Distribution of Depleted Uranium Contamination in Colonie. *Science of the Total Environment,* Volume 2, pp. 297-407.

Malhotra, V. M. & P. K Mehta, 2005. *High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture, proportioning, properties, construction practice, and case histories..* Ottawa: Supplementary cementing materials for sustainable development incorporated.

Rattansak, U., Kanokwan Pankehet, Prinya Chindaprasirt, 2011. Effect of Chemical Admixture on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,* Volume 18, pp. 364-370.

Ryu, G. S., Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, Young Soo Chung, 2013. The Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with Alkaline Activators. *Construction and Building Materials,* Volume 47, pp. 409-4018.

Smith K.R., Veranth J.M., Kodavanti P., Aust A.E., 2006. Acutepulmonary and systemic effect of inhealed coal fly ash in rats: comparison to ambient environmental particles. *Toxicological Sciences,* Volume 93, pp. 390-399.

Tajunnisa, Y., Masaaki Sugimoto, Tetsuya Sato, Mitsuhiro Shigeishi, 2017. A Study on Factors Affecting Geopolymerization of Low Calcium Fly Ash. *GEOMATE,* 13(Geotec., Const. Mat & Env), pp. 100-107.

Tajunnisa, Y., Masaaki Sugimoto, Takahiro Uchinuno, Yoshinori Toda, Arisa Hamasaki, Toru Yoshinaga, Kenji Shida, Mitsuhiro Shigeishi, 2017. Performance of Alkali-Activated Fly Ash Incorporated with GGBSF and Micro-silica in the Interfacial Transition Zone, Microstructure, Flowability, Mechanical Properties and Drying Shrinkage. edinburgh, s.n.

Tajunnisa, Y., Ridho Bayuaji, Nur Ahmad Husin, Yosi Noviari Wibowo, Mitsuhiro Shigeishi, 2019. Characterization Alkali-Activated Mortar Made From Fly Ash and Sandblasting. *GEOMATE,* 17(Geotec., Const. Mat & Env), pp. 183-189.

Tarun R. Naik, Shiw S. Singh, 1993. Fly Ash Generation and Utilization. In: *Recent Trend in Fly Ash Utilization.* s.l.:s.n.

Tennakoon, C., Ahmad Shayan, Jan G Sanjayan, Aimin Xu, 2017. Chloride Ingress and Steel Corrosion in Geopolymer Concrete Based on Long Term Test. *Materials and Design,* Volume 116, pp. 287-299.

Topark-Ngarm P., Prinya Chindaprasirt, Vanchai Sata, 2015. Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering.*

Zhang, Zuhua, Xiao Yao, Huajun Zhu, 2010. Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. Microstructure and anticorrosion mechanism.. *Applied Clay Science,* Volume 49, pp. 7-12.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Hubungan *SDGs* dengan Beton Geopolimer

Industri, Inovasi, dan Infrastruktur (*Goal 9*)	Kemampuan beton geopolimer yang tahan terhadap korosi air laut berpotensi meningkatkan kualitas infrastruktur kelautan yang berkelanjutan sebagai pendukung pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan manusia. Dengan memanfaatkan sumber daya lokal dapat memperluas industri material konstruksi di Indonesia.
Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan (*Goal 11*)	Pengolahan *fly ash* tipe C sebagai limbah padat yang berkelanjutan bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan terhadap permukiman. Menurut Smith (2006), sebagian besar pembuangan *fly ash* di alam dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang berdampak langsung terhadap makhluk hidup.
Penanganan Perubahan Iklim (*Goal 13*)	*Green material* seperti beton geopolimer merupakan teknologi material berkelanjutan dan ramah lingkungan dengan bahan dasar limbah yang mengandung silika dan alumina, seperti halnya material *fly ash*. Pemanfaatan limbah sebagai material konstruksi pengganti semen dapat mengurangi emisi gas CO_2 akibat industri semen yang berpotensi terjadinya perubahan iklim. Penerapan beton geopolimer sebagai material konstruksi selaras dengan **Target 13.3**, yaitu peningkatan kesadaran dan kapasitas sumber daya manusia terdahap pengurangan dampak dan peringatan dini perubahan iklim.

Sumber : Penulis, 2019

Lampiran 2. Klasifikasi Fly Ash

Klasifikasi *Fly Ash* Standar Jepang

Kandungan	Kelas		
	N	F	C
Silikon oksida (SiO_2) + alumunium Oksida (Al_2O_3) +Besi Oksida (Fe_2O_3), min%	70,0	70,0	50,0
Sulfur Trioksida (SO_3), max %	4,0	5,0	5,0
Kelembaman, max %	3,0	3,0	3,0
Loss on Ignition, max %	10,0	6,0	6,0

Sumber: ASTM C618 – 03

Klasifikasi *Fly Ash* Standar Jepang

Kelas		Tipe I	Tipe II	Tipe III	Tipe IV
		Fly ash	Fly ash	Fly ash	Fly ash
Silica dioxide (%)		45.0 atau lebih tinggi			
Moisture content (%)		1.0 atau lebih kecil			
Ignition loss[1] (%)		3.0 atau lebih kecil	5.0 atau lebih kecil	8.0 atau lebih kecil	5.0 atau lebih kecil
Density (%)		1.95 atau lebih tinggi			
Fineness[2]	Residue on 45 µm sieve (screen sieve method)[3] (%)	10 atau lebih kecil	40 atau lebih kecil	40 atau lebih kecil	70 atau lebih kecil
	Specific surface area (Blaine method) (cm^2/g)	5000 or higher	2500 or higher	2500 or higher	1500 or higher
Flow value ratio (%)		105 atau lebih tinggi	95 atau lebih tinggi	85 atau lebih tinggi	75 atau lebih tinggi
Activity index (%)	Material age: 28 days	90 atau lebih tinggi	80 atau lebih tinggi	80 atau lebih tinggi	60 atau lebih tinggi
	Material age: 91 days	100 atau lebih tinggi	90 atau lebih tinggi	90 atau lebih tinggi	70 atau lebih tinggi

Sumber: JIS A6201 - 2008

Lampiran 3. Persyaratan Beton Laut

Kategori dan Kelas Paparan (SNI 2847-2013 Pasal 4.1)

Kategori	Tingkat Keparahan	Kelas	Kondisi	
			Sulfat (SO_4) Larut air dalam tanah, dalam persen masa*	**Sulfat (SO_4) Larut air dalam tanah, dalam ppm[1]**
S Sulfat	Tidak ada	S0	$SO_4 < 0{,}10$	$SO_4 < 150$
	Sedang	S1	$0{,}10 \leq SO_4 < 0{,}20$	$150 \leq SO_4 < 1500$ Air laut
	Parah	S2	$0{,}20 \leq SO_4 \leq 2{,}00$	$1500 \leq SO_4 \leq 10.000$
	Sangat Parah	S3	$SO_4 > 2{,}00$	$SO_4 > 10.000$
P Mensyaratkan Permeabilitas Rendah	Tidak ada	P0	Kontaknya dengan air dimana permeabilitas rendah tidak disyaratkan	
	Disyaratkan	P1	Kontaknya dengan air dimana permeabilitas rendah disyaratkan	
C Proteksi Korosi Tulangan	Tidak ada	C0	Beton kering atau terlindungi dari kelembaban	
	Sedang	C1	Beton terpapar terhadap kelembaban tetapi tidak terhadap sumber klorida luar	
	Parah	C2	Beton terpapar terhadap kelembaban dan sumber klorida eksternal dari bahan kimia, garam, air aisn, air payau, atau percikan dari sumber – smber ini	

*Persen sulfat dalam masa dalam tanah harus ditentukan dengan ASTM C1580
[1]Konsentrasi sulfat larut dalam air dalam ppm harus ditentukan dengan ASTM D516 atau D4130

Persyaratan untuk Beton dengan Kelas Paparan (SNI 2847-2013 Pasal 4.2)

Kelas Paparan	w/cm maks	f_c' min., MPa	Persyaratan Minimum tambahan			
			Material sementiusius[T]----tipe			**Material campuran tambahan kalsium klorida**
			ASTM C150	**ASTM C595**	**ASTM C1157**	
S0	T/A	17	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan tipe	Tanpa batasan
S1	0,50	28	II	IP(MS), IS(<70) (MS)	MS	Tanpa batasan
S2	0,45	31	V	IP(HS) + IS(<70) (HS)	HS	Tidak diizinkan
S3	0,45	31	V + pozzolan atau *slag*[II]	IP(HS) + pozzolan atau kerak atau IS(<70) (HS) + pozzolan atau *slag*[II]	HS + pozzolan atau *slag*[II]	Tidak diizinkan
P0	T/A	17	Tidak ada			
P1	0,50	28	Tidak ada			

			Kadar ion klorida (Cl^-) larut air maksimum dalam beton, persen oleh berat semen[#]		Ketentuan terkait
			Beton bertulang	**Beton prategang**	
C0	T/A	17	1,00	0,06	Tidak ada
C1	T/A	17	0,3	0,06	
C2	0,40	35	0,15	0,06	7.7.6, 18.16[**]

[*]Untuk beton ringan, lihat 4.1.2.

[†]Kombinasi alternatif material sementisius dari materialyang dalam Tabel 4.3.1 harus diizinkan bila diuji untuk ketahanan sulfat dan memenuhi kriteria dalam 4.5.1.

[‡]Untuk paparan air laut, tipe semen Portland lainnya dengan kadar trikalsium (C_3A) samai dengan 10 persen diizinkan jika w/cm tidak melebihi 0,40

[§]Tipe semen tersedia lainnya seperti tipe III atau tipe I diizinkan dalam kelas paparan S1 atau S2 jika kadar C_3A masing – masing kurang dari 8 atau 5 persen.

[ll]Jumlah sumber spesifik pozzolan atau *slag* yang digunakan tidak boleh kurang dari jumlah yang telah ditentukan oleh catatan layan untuk meningkatkan ketahanan sulfat bila dignakan dalam beton yang mengandung semen tipe V. Sebagai alternative, jumlah sumber spesifik pozzolan atau *slag* yang digunakan tidak boleh kurang dari jumlah yang diuji sesuai dengan ASTM C 1012M dan memenuhi kriteria dalam 4.5.1

[#]kadar ion klorida larut air yang disumbang dari material dasar termasuk air, agregat, material sementisius, dan material campuran tambahan harus ditentukan pada campuran beton oleh ASTM 1218M saat umur antara 28 dan 42 hari

[**]Persyaratan 7.7.6 harus dipenuhi. Lihat 18.16 untuk tendontanpa lekatan.

Lampiran 4. Ringkasan Penelitian Sebelumnya

Tahun	Peneliti	Judul Penelitian	Analisis	Hasil Penelitian
1991	Joseph Davidovits	Geopolymers: inorganic polymeric new materials	Derajat polimerisasi berdasarkan rasio molar Si/Al (Metode Normal)	Komposisi geopolimer optimum dengan rasio molar Si/Al = 2
1999	A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco	Alkali-activated fly ashes a cement for the future	Pengaruh temperatur tinggi terhadap mutu beton geopolimer (Metode Normal)	Beton geopolimer berbasis *fly ash* mengalami peningkatan mutu di lingkungan temperatur tinggi
2005	Djwantoro Hardjito	Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete	Penggunaan *Fly Ash* tipe F sebagai material pengikat (Metode Normal)	Geopolimer berbasis *fly ash* tipe F menghasilkan beton bermutu tinggi
2008	Nguyen Van Chanh, Bui Dang Trung, Dang Van Tuan	Recent Research Geopolymer Concrete	Ketahanan beton geopolimer terhadap temperatur tinggi dan sifat korosif air laut (Metode Normal)	Beton geopolimer memiliki ketahanan yang baik pada lingkungan laut.
2019	Yuyun Tajunnisa, Ridho Bayuaji, Nur Ahmad Husin, Yosi Noviari Wibowo, Mitsuhiro Shigeishi	Characterization Alkali-Activated Mortar Made From Fly Ash and Sandblasting	Pengaruh substitusi limbah sandblasting terhadap kuat tekan dan waktu pengerasan beton geopolimer berbasis *fly ash* tipe C (Metode Normal)	Substitusi limbah sandblasting dapat memperpanjang waktu pengerasan beton geopolimer berbasis *fly ash* tipe C
2009	Ubolluk Rattasak, Prinya Chindaprasirt	Infuence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer	Proses *leaching* fly ash oleh larutan NaOH (Metode Terpisah)	Perpanjangan waktu ikat oleh proses *leaching* fly ash dengan NaOH 10M selama 10 menit
2011	Ubolluk Rattanasak, Kanokwan Pankhet, Prinya Chindaprasirt	Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer	Waktu ikat dan *workability* beton geopolimer berbasis fly ash tipe C (Metode Terpisah)	Penambahan Na_2SiO_3 1wt% memperpanjang waktu ikat dan meningkatkan mutu beton geopolimer

Tahun	Peneliti	Judul Penelitian	Analisis	Hasil Penelitian
2012	Prinya Chindaprasirt, Pre De Silva, Kwesi Sagoe-Crentsil, Sakonwan Hanjitsuwan	Effect of SiO_2 and Al_2SiO_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer system	Mutu beton berdasarkan rasio SiO_2/Al_2O_3 pada beton geopolimer berbasis fly ash tipe C (Metode Terpisah)	Rasio molar SiO_2/Al_2O_3 lebih dari 4.3 menurunkan mutu beton
2015	Pattanapong Topark-Ngarm, Prinya Chindaprasirt, Vanchai Sata	Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete	Variasi molar tinggi NaOH terhadap waktu ikat dan mutu beton geopolimer (Metode Terpisah)	Komposisi optimum geopolimer dengan kadar Na_2O 12% dan NaOH 15M

Lampiran 5. Perawatan Benda Uji

Perawatan Benda uji ke dalam air laut (ASTM D1141-98)

Sumber: Penulis, 2019

Perawatan Benda Uji Dengan Paparan Udara Bebas

Sumber: Penulis 2019

Lampiran 6. Timeline Kegiatan

No	Nama Kegiatan	Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3				Bulan 4				Bulan 5			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur																				
2	Persiapan Material																				
3	Uji Karakteristik Material																				
4	Pembuatan *Mix Design* dan Benda Uji Beton																				
5	*Curing* Benda Uji																				
6	Pengujian Benda Uji																				
7	Analisa Hasil																				
8	Pembuatan Laporan Akhir dan Kesimpulan																				
9	Pembimbingan Dosen																				

Sumber: Penulis, 2019

Lampiran 7. Rincian Anggaran Pelaksanaan

Rincian Pengujian Material

Material	Justifikasi pemakaian	Kuantitas	Harga Satuan (Rp.)	Jumlah (Rp.)
Tes XRF	Untuk Mengetahui Karakteristik Material	1 Kali	250.000	250.000
Tes XRD	Untuk Mengetahui Karakteristik Material	1 kali	100.000	100.000
Uji *Setting Time*	Untuk Mengetahui Waktu Pengerasan Beton	2 kali	40.000	80.000
Uji Kuat Tekan	Untuk Mengetahui Kuat Tekan Beton	36 kali	20.000	720.000
Uji UPV	Untuk Mengetahui Kepadatan Beton	36 kali	20.000	720.000
Uji Permeabilitas	Untuk Mengetahui Sifat Permeabilitas Beton Terhadap Air	6 kali	100.000	600.000
			Sub Total	2.470.000

Sumber: Penulis, 2019

Rincian Anggaran Pembelian Material

Material	Justifikasi pemakaian	Kuantitas	Harga Satuan (Rp.)	Jumlah (Rp.)
Fly Ash	Sebagai Bahan Beton	5 sak	5.000/sak	25.000
Agregat Kasar	Sebagai Bahan Beton	10 sak	18.000/sak	180.000
Agregat Halus	Sebagai Bahan Beton	20 sak	20.000/sak	400.000
Natrium Hidroksida	Sebagai Aktivator	20 kg	15.000/kg	300.000
Na_2SiO_3	Sebagai Aktivator	25 kg	7.000/kg	175.000
			Sub Total	1.080.000

Sumber: Penulis, 2019

Total Anggaran Biaya

No.	Pengeluaran	Total Harga (Rp)
1	Pengujian Material	2.470.000
2	Pembelian Material	1.080.000
Total Pengeluaran		**3.550.000**

Sumber: Penulis, 2019

Lampiran 8. Klasifikasi Kualitas Beton

Kriteria Kecepatan Pulsa Gelombang Pulsa untuk Klasifikasi Beton

(IS 1331101-1992)

Kecepatan Gelombang Pulsa, V (m/s)	Kualitas Beton
>4500	Istimewa
3500 – 4500	Baik
3000 – 3500	Sedang
< 3000	Meragukan

Klasifikasi kualitas beton berdasarkan Koefisien Permeabilitas (SN 505 252/1, Annex E)

Kualitas Beton	Indeks	kT ($10^{-16} m^2$)
Sangat Jelek	5	>10
Jelek	4	1.0-10
Normal	3	0.1-1.0
Baik	2	0.01-0.1
Sangat Baik	1	<0.01

(Operating Instruction Permeability Tester TORRENT)

Lampiran 9. *Roadmap* Implementasi *G-Marine Concrete*

<table>
<tr><th>Topik Penelitian</th><th>2017</th><th>2018</th><th>2019</th><th>2020</th><th>2021</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Struktur pracetak beton geopolimer untuk aplikasi bangunan pelabuhan</td><td>Teknologi beton geopolimer berbasis high-calcium fly ash
(Metode Normal)</td><td rowspan="3">Sifat fisik, mekanik, dan proses polimerisasi beton geopolimer berbasis high-calcium fly ash akibat pengaruh lingkungan korosif / air laut (Metode Terpisah)</td><td colspan="2" rowspan="3">Durabilitas beton geopolimer berbasis high-calcium fly ash pada lingkungan korosif / air laut (Metode Terpisah)</td><td rowspan="3">Struktur pracetak beton geopolimer untuk dermaga</td></tr>
<tr><td>Teknologi beton geopolimer dengan campuran bahan limbah lokal (Metode Normal)</td></tr>
<tr><td>Sifat fisik, mekanik, dan proses polimerisasi beton geopolimer dengan campuran limbah (Metode Normal)</td></tr>
</table>

Penelitian Fundamental

Penelitian Terapan

Penelitian Industri

Sumber: Penulis, 2019

Lampiran 10. Perbandingan Harga Beton Laut Konvensional dengan G-Marine

Material	Harga Satuan/Kg	Kebutuhan (Kg)		Harga per m^3	
		Beton Konvensional	*G-Marine*	Beton Konvensional	*G-Marine*
Fly Ash	Rp125	-	504	-	Rp53.000
NaOH	Rp10.000	-	36	-	Rp540.000
Na_2SiO_3	Rp7.000	-	108	-	Rp756.000
Semen Portland II	Rp1.625	720	-	Rp1.170.000	-
Agregat Halus	Rp148	672	504	Rp99.456	Rp74.592
Agregat Kasar	Rp197	1008	1176	Rp198.576	Rp231.672
Total Harga				Rp1.655.264	Rp1.468.032

Lampiran 11. Total Anggaran Biaya

Anggaran Biaya Beton Laut Konvensional

Umur Bangunan	Biaya Maintenance Beton per m^3	*Discount rate (Ministry of Foreign Affairs, Japan)*	Biaya Maintenance Beton per m^3 (Setelah *Discount Rate*)
ti	Ci	v	$\frac{Ci}{(1+v)^{ti}}$
8	Rp 440.409,60	0,06	Rp 276.318,43
16	Rp 440.409,60	0,06	Rp 173.365,60
24	Rp 440.409,60	0,06	Rp 108.771,72
32	Rp 440.409,60	0,06	Rp 68.244,73
40	Rp 440.409,60	0,06	Rp 42.817,58
48	Rp 440.409,60	0,06	Rp 26.864,28
Total Biaya Maintenance			Rp 696.382,35
Biaya Pengadaan Beton Per m^3			Rp 1.468.032,00
Total Biaya Pengeluaran			Rp 2.164.414,35

Anggaran Biaya *G-Marine*

Umur Bangunan	Biaya Maintenance Beton per m^3	*Discount rate (Ministry of Foreign Affairs, Japan)*	Biaya Maintenance Beton per m^3 (Setelah *Discount Rate*)
ti	Ci	v	$\frac{Ci}{(1+v)^{ti}}$
21	Rp 496.579,20	0,06	Rp 146.071,45
42	Rp 496.579,20	0,06	Rp 42.967,71
Total Biaya Maintenance			Rp 189.039,16
Biaya Pengadaan Beton Per m^3			Rp 1.655.264,00
Total Biaya Pengeluaran			Rp 1.844.303,16

Lampiran 12. Rangkuman hasil pengujian

Uji *Setting Time*			
Metode	**Standar Pengujian**	**Hasil Pengujian**	**Cek Hasil**
Normal	SNI 03-6827-2002	15 Menit	Tidak Memenuhi
Terpisah		195 Menit	Tidak Memenuhi
Uji Kuat Tekan			
Metode	**Standar Pengujian**	**Hasil Pengujian**	**Cek Hasil**
Normal	SNI 2847-2013	33,93 MPa	Tidak Memenuhi
Terpisah		40,34 MPa	Memenuhi
Uji UPV (*Ultraviolet Pulse Velocity*)			
Metode	**Standar Pengujian**	**Hasil Pengujian**	**Cek Hasil**
Normal	IS 1331101-1992	2763,3 m/s	Meragukan
Terpisah		4046,67 m/s	Baik
Uji Permeabilitas			
Metode	**Standar Pengujian**	**Hasil Pengujian**	**Cek Hasil**
Normal	SN 505 252/1, Annex E	$0,444 . 10^{-16} m^2$	Normal
Terpisah		$0,167 . 10^{-16} m^2$	Normal